

8. Шульц Е.В., Вахренева О.А. Дифференциальная диагностика клиничко-электроэнцефалографическим методом невращения и церебральных резидуально-органических расстройств с неврозоподобными проявлениями // Вестник психотерапии. 2013. № 48. С. 68-79.
9. Бабин С.М. и др. Невротические, связанные со стрессом и соматоформные расстройства / Уч. пособие. – СПб., 2015. 118 с.
10. Караваева Т.А. и др. Критерии и алгоритм диагностики тревожно-фобических расстройств // Обозрение психиатрии и медицинской психологии имени В.М. Бехтерева. 2015. № 4. С. 117-122.
11. He P., Wilson G. et al. Removal of ocular artifacts from the EEG: A comparison between time-domain regression method and adaptive learning method using simulated data // Med. Biol. Eng. Comput. 2007. Vol. 45. № 5. PP. 495-503.
12. Каплан А.Я., Борисов С.В. Динамика сегментных характеристик альфа-активности ЭЭГ человека в покое и при когнитивных нагрузках // Журнал высш. нервн. деят. 2003. № 53. С. 22-32.
13. Bau D., Trefethen L. Numerical linear algebra. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997. 390 p.
14. Borse S. EEG de-noising using wavelet transform and fast ICA // IJSET – International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2015. Vol. 2. Iss. 7. PP. 200-206.
15. Santillan-Guzmán A., Fischer M. et al. Real-time empirical mode decomposition for EEG signal enhancement / EUSIPCO. 2013. PP. 1-5.
16. Turnip A., Pardede J. Artefacts Removal of EEG Signals with Wavelet Denoising / MATEC Web of Conferences. 2017. PP. 1-10.
17. Минаков Э.В., Кудашова Е.А., Воронина Е.А. Способ диагностики аффективных расстройств у пациентов с ИБС по данным энцефалографического исследования / Патент РФ. № 2419383. 27.05.2011.
18. Обухов Ю.В., Королев М.С., Габова А.В. и др. Способ ранней электроэнцефалографической диагностики болезни Паркинсона / Патент РФ. № 2484766. 20.06.2013.
19. Bajaj V., Pachori R. EEG Signal Classification Using Empirical Mode Decomposition and Support Vector Machine / Proceedings of the International Conf. on SocProS. 2011. PP. 581-592.
20. Pachori R., Bajaj V. Analysis of Normal and Epileptic Seizure EEG Signals using Empirical Mode Decomposition // Compute Methods Programs Biomed. 2011. № 3. PP. 373-381.
21. Huang N. The Hilbert-Huang Transform and its Applications / World Scientific Publishing. 2005. 526 p.
22. Huang N. An Introduction to Hilbert-Huang Transform: A Plea for Adaptive Data Analysis / Research Center for Adaptive Data Analysis. 2007. 257 p.
23. Tyckov A.Y. Development and Study of a Virtual Encephalograph // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49. Iss. 1. PP. 37-41.
24. Kuzmin A.V., Tyckov A.Y., Alimuradov A.K. Development of Effective Noise Biomedical Signals Processing Method // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. № 4. PP. 8527-8531.
25. Bodin O.N., Churakov P.P. et al. An information-measurement system for preprocessing of photofluorographic images // Measurement Techniques. 2011. № 4. PP. 41-44.
26. Alimuradov A.K., Frantsuzov M.V. et al. Program Implementation of an Algorithm for Recognition of Speech Signals in the Labview Graphics Programming Environment // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58. Iss. 9. PP. 965-969.

*Александр Юрьевич Тычков,  
канд. техн. наук, зам. директора,  
Научно-исследовательский институт  
фундаментальных и прикладных исследований,  
г. Пенза,  
e-mail: tyckov-a@mail.ru*

*А.Г. Гудков, В.Ю. Леушин, И.А. Сидоров, С.Г. Веснин, И.О. Порохов, М.К. Седанкин,  
С.В. Агасиева, С.В. Чижиков, Е.Н. Горлачева, М.И. Лазаренко, В.Д. Шашурин*

## **Использование метода многоканальной микроволновой радиометрии для функциональной диагностики головного мозга**

### **Аннотация**

Приведены результаты разработки экспериментального образца прибора для неинвазивной диагностики функционального состояния головного мозга, основанной на принципах многоканальной микроволновой радиометрии.

### **Введение**

В настоящее время в медицинской практике особое внимание уделяется неинвазивным методам исследования головного мозга, что является актуальным при диагностике общемозговых нарушений, инсультов, опухолей и различных черепно-мозговых травм. Согласно статистике, в мире на каждые 100 000 человек приходится 250...300 инсультов. Известно, что существует связь между нарушениями в нормальной работе или заболеваниями различных органов живого организма и изменениями локальной температуры этих органов. Огромный интерес медиков, биологов и биофизиков к микроволновой радиометрии (МР) обусловлен тем, что она представляет собой бескровный, безболезненный, оперативный и абсолютно безвредный метод измерения глубинных температур внутренних областей тела человека на основе исследования собственного электромагнитного излучения тканей тела человека в

радиочастотном диапазоне [1]-[4]. Использование микроволновой радиометрии для функционального исследования головного мозга позволяет локализовать источники термонеднородностей, регистрировать отклики на воздействие физических и химических факторов в процессе исследования, регистрировать пространственно-частотные характеристики и устанавливать связь между параметрами этих характеристик и физиологическими параметрами головного мозга, корректировать процесс лечения соответственно изменениям параметров электромагнитного излучения головного мозга.

### **Материалы и методы**

Принцип действия микроволновой радиометрии основан на использовании естественного электромагнитного излучения произвольными объектами (в том числе и тканями живых существ), температура  $T$  которых отлична от абсолютного нуля. Для определения температуры внутренних органов че-

ловека наиболее эффективным оказывается прием энергии теплового излучения на частотах СВЧ-диапазона, соответствующих дециметровым и сантиметровым длинам волн (обычно в интервале 0,7...5,0 ГГц). Плотность энергии  $u$  теплового излучения на СВЧ прямо пропорциональна абсолютной температуре  $T$ ; в соответствии с известным законом Рэлея-Джинса

$$u(\alpha\omega_m, T) \cong \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\alpha\omega_m}{c} \right)^2 kT, \quad (1)$$

где  $\alpha = \omega / \omega_m$ ;  $\omega$  – частота;  $\omega_m$  – частота максимума плотности энергии;  $k$  – постоянная Больцмана.

Измерение плотности теплового излучения тела человека в СВЧ-диапазоне осуществляется с помощью радиометрического приемника с подключенными к его входу антеннами-аппликаторами. По измеренной плотности теплового излучения вычисляется так называемая радиояркостная температура.

Необходимое пространственное разрешение при исследовании головного мозга может быть получено путем использования многоканальных радиометрических приемников совместно с многоканальными антенными решетками. В составе таких антенных решеток используются антенны-аппликаторы, число которых равно числу входных каналов приемника. Использование антенной решетки и многоканальных радиометрических приемников, работающих в СВЧ-диапазоне, позволяет проводить динамические исследования глубинных (до 4 см) температур головного мозга при точности измерения около 0,1 °С. Компьютерная обработка результатов измерений радиояркостных температур позволяет представить эти результаты в виде температурных карт и динамических графиков, по которым врач осуществляет диагностику заболеваний. На рис. 1 представлена структурная схема многоканальной радиометрической системы для неинвазивной диагностики функционального состояния головного мозга.

Для сигналов на выходе радиометрического приемника при соответствующих коммутациях входящих в их состав выключателя антенн и генератора шума действительны выражения

$$U_A = [T_A(1 - K_U) + T_{CH}K_U]S + U_0; \quad (2)$$

$$U_{ГШ} = ST_{ГШ} + U_0; \quad (3)$$

$$U_H = ST_{CH} + U_0; \quad (4)$$

$$U_{ОТР} = ST_{ГШ}K_U + U_0; \quad (5)$$

где  $U_A$  – напряжение на выходе приемника при приеме сигнала от антенны;  $U_{ГШ}$  – напряжение на выходе приемника при работе от «горячего» эталона;  $U_H$  – напряжение на выходе приемника при работе от «холодного» эталона;  $U_{ОТР}$  – напряжение на выходе приемника при поступлении на вход приемника сигнала генератора шума, отраженного от раздела антенна-среда;  $T_{CH}$  – температура согласованной нагрузки;  $T_{ГШ}$  – температура генератора шума. В этих четырех уравнениях неизвестными являются измеряемая яркостная температура  $T_A$ , крутизна вольт-градусной характеристики  $S$ , постоянная составляющая  $U_0$  и коэффициент отражения по напряжению  $K_U$ .

Решение системы уравнений (2)-(5) с четырьмя неизвестными дает

$$U_0 = \frac{U_H T_{ГШ} - U_{ГШ} T_H}{T_{ГШ} - T_H}; \quad (6)$$

$$S = \frac{U_{ГШ} - U_H}{T_{ГШ} - T_H}; \quad (7)$$

$$K_U = \frac{U_{ОТР} - U_0}{S T_{ГШ}}; \quad (8)$$

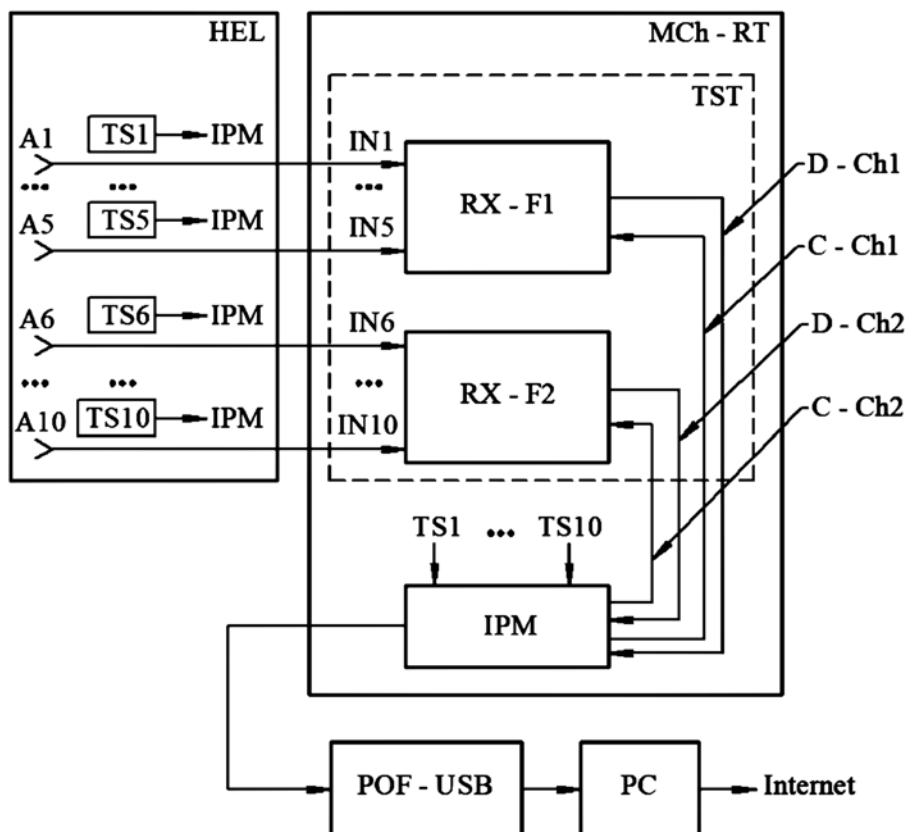


Рис. 1. Структурная схема многоканальной радиометрической системы для неинвазивной диагностики функционального состояния головного мозга: HEL – шлем; A1... A5, A6...A10 – антенны-аппликаторы; TS1...TS5, TS6...TS10 – датчики температуры; MCh-RT – многоканальный радиотермограф; TST – термостат; RX-F1 – радиометрический приемник первого частотного диапазона; RX-F2 – радиометрический приемник второго частотного диапазона; IPM – модуль обработки информации; IN1...IN5, IN6...IN10 – антенные входы радиометрических приемников; D-Ch1, D-Ch2 – первый и второй каналы передачи данных; C-Ch1, C-Ch2 – первый и второй каналы управления; POF-USB – адаптер «оптический кабель – порт USB»

$$T_{Я} = \frac{U_A - T_{CH}SK_U - U_0}{S(1 - K_U)} \quad (9)$$

Анализ выражений (6)-(9) показывает, что система уравнений имеет решение при выполнении следующих условий:

- шумовая температура генератора шума не равна температуре шума нагрузки;
- крутизна вольт-градусной характеристики  $S$  не равна нулю;
- температура шума генератора шума не равна нулю;
- коэффициент отражения  $K_U$  не равен единице.

На практике эти условия всегда выполняются, следовательно, система уравнений всегда имеет решение, что доказывает работоспособность рассматриваемой радиометрической системы. Таким образом, учет рассогласования антенны повышает достоверность определения радиояркой температуры объекта. Повторение описанного выше алгоритма измерений радиоярких температур поочередно для всех остальных антенн-аппликаторов антенной решетки позволяет получить данные о радиоярких температурах различных областей головного мозга.

В основу 10-канальной микроволновой антенной решетки, размещаемой в шлеме, была положена конструкция U-образной вибраторной антенны. Антенна представляет собой симметричный диполь, плечи которого, с целью снижения габаритных размеров, имеют U-образную форму. Проекция токонесущих элементов антенного модуля на поверхность биологической нагрузки составляет  $26 \times 27$  мм. Такая антенна имеет малые размеры, небольшую величину КСВН (1,05...1,45) в указанном выше диапазоне частот. При контакте с различными биологическими тканями ее конструкция позволяет обеспечить хорошее прилегание к различным участкам тела пациента.

На основе результатов проведенных исследований с учетом ранее полученных данных [5]-[7] разработан экспериментальный образец многоканальной радиометрической системы для неинвазивной диагностики функционального состояния головного мозга, имеющий в своем составе персональный компьютер и соответствующее программное обеспечение, обеспечивающее построение и вывод на экран монитора термокарт. По динамике изменения температур различных областей головного мозга за определенный промежуток времени, в ответ на различные физиологические тесты, например глюкозный тест или гипервентиляцию, по данным измеренных значений внутренних температур можно диагностировать патологии, например сосудистые изменения или новообразования.

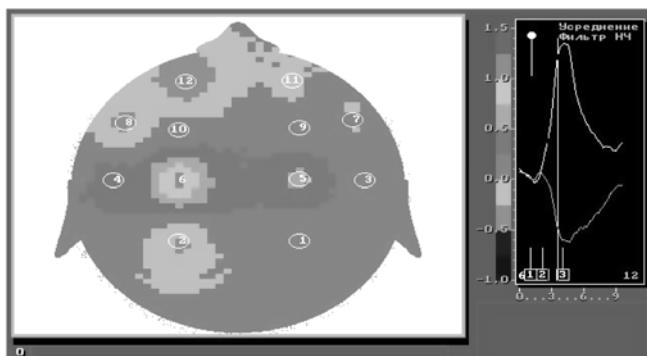


Рис. 2. Результаты радиотермокартирования головного мозга с проведением пробы с гипервентиляцией у больного, страдающего эпилептическим синдромом

В работе [8] рассмотрены возможности неинвазивного метода выявления патологий живых тканей человека, основанные на пассивном дистанционном зондировании в СВЧ-диапазоне, приведены описания медицинских методик выявления патологий в функционировании головного мозга в динамическом режиме с использованием многоканального радиотермографа, а также результаты проведенных обследований. На рис. 2 в качестве примера показаны результаты радиотермокартирования головного мозга с проведением пробы с гипер-

вентиляцией у больного, страдающего эпилептическим синдромом. Отмечены снижение температуры в левых лобной, теменной и передневисочной областях и значительное увеличение температуры в зоне очага эпилептогенной активности в левой центральной области.

Отличительной особенностью создаваемого многоканального радиотермографа является одновременное использование двух радиометрических приемников, предназначенных для работы в диапазонах длин волн 40 и 20 см. Это позволяет после обработки сигналов собственного излучения получить динамическое 3D цифровое изображение радиояркой температуры в глубине исследуемого объекта в реальном масштабе времени под влиянием различных нагрузок и функциональных проб.

## Заключение

Приведены результаты разработки основных узлов и экспериментального образца многоканальной радиометрической системы для неинвазивной диагностики функционального состояния головного мозга, основанной на принципах многоканального радиотермокартирования, с помощью которой можно осуществлять непрерывную регистрацию биомедицинских сигналов в течение временного интервала, длительность которого определяется временем формирования исследуемых физиологических изменений, связанных с применением функционально-нагрузочных проб (физиологических тестов), которые оказывают влияние на параметры гемодинамики в тканях головного мозга.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», договор (соглашение) 332ГРНТИС5/42723 от 13.08.2018 г. о предоставлении гранта на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Разработка и организация производства персонального телеметрического прибора для неинвазивной диагностики функционального состояния головного мозга в процессе реабилитации после инсульта и травм головы на основе нахождения 3D распределения радиояркой температуры методами многоканальной микроволновой радиометрии», заявка НТИ-49851 в целях реализации планов мероприятий НТИ «Хелснет».*

## Список литературы:

1. Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Цыганов Д.И. и др. Пассивные и активные радиолокационные методы исследований и диагностики живых тканей человека // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. № 11. С. 14-20.
2. Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Плющев В.А. и др. Использование методов радиолокации в радиочастотном и оптическом диапазонах для выявления патологий живых тканей человека / 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006). Севастополь, 11-15 сентября 2006 г. Материалы конф. в 2-х т. – Севастополь: Вебер, 2006. Т. 2. С. 903-904.
3. Sedankin M.K., Leushin V.Yu., Gudkov A.G., Vesnin S.G., Sidorov I.A., Agasieva S.V., Markin A.V. Mathematical Simulation of Heat Transfer Processes in a Breast with a Malignant Tumor // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52. Iss. 3. PP. 190-194.
4. Gudkov A.G., Sedankin M.K., Leushin V.Yu., Vesnin S.G., Sidorov I.A., Agasieva S.V., Ovchinnikov L.M., Vetrova N.A. Antenna Applicators for Medical Microwave Radiometers // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52. № 4. PP. 235-238.
5. Gudkov A.G., Leushin V.Y., Sidorov I.A. et al. Element Base for Radio Passive Device / Proceedings of the Russian-Bavarian Conference on Biomedical Engineering. 29-31 May 2012. Saint Petersburg, 2012. PP. 154-155.
6. Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Сидоров И.А. и др. Электронный модуль многоканального СВЧ тракта для систем ра-

диотермокартирования // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 1. С. 27-34.

7. Бобрин А.Ф., Гудков А.Г., Леушин В.Ю. и др. Моделирование антенн-аппликаторов унифицированных антенных решеток модульного типа для многоканальных систем радиотермокартирования // Антенны. 2014. № 2. С. 17-26.
8. Анзимиров В.Л., Гудков А.Г., Леушин В.Ю. и др. Современные возможности и перспективы нейротепловидения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 3. С. 49-54.

*Александр Григорьевич Гудков,*  
д-р техн. наук, профессор,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
*Виталий Юрьевич Леушин,*  
канд. техн. наук, доцент,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
гл. специалист,  
ООО «НПП «Технологические инновации»,  
*Игорь Александрович Сидоров,*  
канд. техн. наук, начальник отдела,  
АО «Концерн «Вега»,  
*Сергей Георгиевич Веснин,*  
канд. техн. наук, генеральный директор,  
ООО «Фирма «РЭС»,  
*Игорь Олегович Порохов,*  
канд. технических наук, начальник сектора,  
АО «ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга»,

*Михаил Константинович Седанкин,*  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
ФГБУ ГНИИЦ РТ МО РФ /  
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,  
*Светлана Викторовна Агасиева,*  
канд. техн. наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Российский университет  
дружбы народов»,  
гл. специалист,  
ООО «НПП «Технологические инновации»,  
*Сергей Владимирович Чижиков,*  
аспирант,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
генеральный директор,  
ООО «НПП «Технологические инновации»,  
*Евгения Николаевна Горлачева,*  
канд. эконом. наук, доцент,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
гл. специалист,  
ООО «НПП «Технологические инновации»,  
*Михаил Иванович Лазаренко,*  
д-р мед. наук, доцент,  
ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России,  
*Василий Дмитриевич Шашиурин,*  
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,  
кафедра «Технологии приборостроения»,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва,  
e-mail: ooo.giperion@gmail.com

**В.А. Бывальцев, И.А. Степанов, М.А. Алиев**

## **Интраоперационная мультиспиральная компьютерная томография при хирургическом лечении интрадуральных опухолей спинного мозга**

### **Аннотация**

Статья посвящена новому техническому решению в хирургическом лечении интрадуральных опухолей спинного мозга - применению интраоперационной мультиспиральной компьютерной томографии (иМСКТ). Методика иМСКТ при сопоставлении с данными предоперационных магнитно-резонансных томограмм позволяет четко определить уровень расположения опухоли, минимизировать объем рассеечения мягких тканей и костной резекции и тем самым снизить риски развития различных нежелательных явлений. Указанный метод интраоперационной навигации может быть рекомендован к использованию в хирургическом лечении ИОСМ.

### **Введение**

Различные методы интраоперационной навигации в нейрохирургии применяются с начала 90-х годов прошлого столетия. При этом большая часть данных методов навигации используется в краниальной нейрохирургии с целью улучшения эффективности и сокращения продолжительности выполняемого оперативного вмешательства [1]. В спинальной нейрохирургии интраоперационная навигация, в частности интраоперационная мультиспиральная компьютерная томография (иМСКТ), в основном применяется для точного введения винтовых систем в ножки позвонков и контроля расположения установленных имплантов [2]-[4].

Как известно, микронейрохирургическая резекция интрадуральных опухолей спинного мозга (ИОСМ) требует выполнения классических открытых (ламинэктомия) или минимально инвазивных методик (гемиламинэктомия, ламинотомия с ламинопластикой) [3]. Объем резекции костных структур позвонка во многом зависит от топографо-анатомической локализации ИОСМ, их размеров и правильности выполне-

ной предоперационной рентгенографической разметки. В ряде случаев изменение положения тела пациента на операционном столе может привести к смещению структур позвоночного канала, в том числе и ИОСМ, что значительно снижает точность рентгенографической разметки [4]. В свою очередь, это вынуждает нейрохирурга увеличивать объем рассеечения мягких тканей и резекции костных структур для улучшения визуализации ИОСМ. Безусловно, расширение анатомического коридора и увеличение объема резекции костных структур ассоциированы с развитием ряда нежелательных явлений, среди которых необходимо отметить следующие: послеоперационные деформации позвоночника и нестабильность его сегментов, сдавление твердой мозговой оболочки гематомой, формирование грубого оболочечно-спинномозгового рубца с нарушением ликвороциркуляции и стенозированием дурального мешка, а также инфекции в области хирургического вмешательства [5].

Методика иМСКТ при помощи различных режимов позволяет нейрохирургу определить точную локализацию ИОСМ на различных этапах выполнения оперативного вмешательства с учетом изменений положения тела пациента на операцион-